

CONCEPTION ET OPTIMISATION DE MURS VÉGÉTALISÉS POUR LA REDUCTION DU BRUIT INDUIT PAR LES CYCLONES DANS LE BASSIN SUD-OUEST DE L'OcéAN INDIEN

Rajaonarison L Dina P, Rajaonarison Henintsoa K, Rajaonarison Ken E, Rajaonarison Eddie Frank (*)

Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, Antananarivo 101, Madagascar

(*) e-mail : heryzaiany@gmail.com

Résumé

Cet article propose des solutions de végétalisation urbaine pour réduire les nuisances sonores causées par les cyclones dans le sud-ouest de l'océan Indien. La recherche se concentrera sur la conception de murs végétalisés adaptés aux conditions climatiques cycloniques, en étudiant la sélection des plantes et la structure des murs. Des prototypes seront testés en laboratoire pour évaluer leur efficacité acoustique. L'optimisation des murs prendra en compte la résistance aux vents, la durabilité des matériaux et l'impact environnemental. Nous avons fourni des données précises sur la réduction des niveaux sonores dans les zones équipées de murs végétalisés, démontrant l'efficacité des solutions végétales dans l'atténuation du bruit cyclonique.

Mots clés : Cyclones, Nuisances sonores, Végétalisation urbaine, Atténuation acoustique, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), Bien-être des populations.

I. INTRODUCTION

Cet article propose la conception et l'expérimentation de solutions de végétalisation urbaine pour atténuer les nuisances sonores provoquées par les vents violents et les précipitations intenses associés aux cyclones. Les régions côtières du bassin sud-ouest de l'Océan Indien sont régulièrement exposées aux ravages destructeurs des cyclones, des phénomènes météorologiques caractérisés par des vents violents et des précipitations intenses [1]. Au-delà des dommages matériels et des perturbations économiques qu'ils engendrent, les cyclones génèrent également des nuisances sonores significatives, affectant la qualité de vie des résidents des zones urbaines exposées [2]. Dans ce contexte, cet article se lance dans une exploration approfondie visant à concevoir et à optimiser des murs végétalisés comme une solution innovante pour atténuer le bruit induit par les cyclones. Les cyclones se caractérisent par des vents violents et des variations de pression, accompagnés de précipitations intenses et d'inondations [3].

L'historique des événements cycloniques et leurs conséquences sur l'environnement et les infrastructures urbaines illustrent l'ampleur des défis auxquels ces régions sont confrontées. L'origine du bruit causé par les vents et les précipitations ainsi que ses impacts sur la qualité de vie sont des aspects cruciaux à considérer [4]. Les enjeux pour les zones côtières et les populations urbaines nécessitent des solutions innovantes et durables [5]. L'approche végétale émerge comme une réponse prometteuse, justifiée par sa contribution à la résilience urbaine face aux cyclones : identifier les sources de bruit spécifiques, évaluer les besoins en atténuation acoustique; concevoir des murs végétalisés adaptés aux conditions cycloniques, et optimiser leur efficacité tout en favorisant la biodiversité.

Les influences des vents violents et des précipitations intenses sur la production de bruit sont analysées. Les fréquences dominantes générées par les cyclones et la variabilité temporelle des

niveaux sonores sont explorées. Les effets psychologiques et physiologiques sur les habitants, ainsi que les perturbations dans les activités quotidiennes et le sommeil, sont examinés. Les limitations des méthodes traditionnelles et les besoins en solutions adaptées sont évalués. Les limitations des méthodes conventionnelles et la nécessité d'approches adaptées aux conditions spécifiques du bassin sud-ouest de l'Océan Indien sont soulignées. L'intensification prévue des événements cycloniques et l'augmentation potentielle des niveaux de bruit associés sont mis en évidence. La contribution à la résilience urbaine face aux changements climatiques, l'amélioration de la qualité de vie des habitants, le rôle des murs végétalisés dans la réduction du bruit cyclonique, et leur durabilité et avantages environnementaux sont discutés.

En soulignant l'urgence de solutions novatrices, cette introduction crée une base solide sur la conception et l'optimisation de murs végétalisés pour atténuer les nuisances sonores induites par les cyclones dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien."

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Conception des murs végétalisés adaptés aux conditions cycloniques locales

Cette section présente le premier objectif majeur de notre recherche : concevoir des murs végétalisés spécifiquement adaptés aux conditions cycloniques locales du bassin sud-ouest de l'océan Indien.

II.1.1. Identification des espèces végétales résilientes

Nous avons sélectionné des espèces végétales capables de résister aux vents violents et aux conditions climatiques spécifiques des cyclones, telles que l'*Armeria Maritima*, le *Calluna Vulgaris* et le *Cytisus Praecox*, mesurant respectivement 10 cm x 20 cm, 30 cm x 50 cm et 1,50 m x 1,50 m.

Nous avons également pris en compte leur adaptabilité aux sols urbains et leur résistance aux inondations causées par les précipitations intenses. L'enjeu réside dans la réduction de l'imperméabilisation des sols urbains et l'augmentation de leur capacité d'infiltration.

II.1.2. Intégration de technologies innovantes

Nous avons exploré l'intégration de matériaux absorbants acoustiques innovants pour renforcer l'efficacité des murs végétalisés dans l'absorption des ondes sonores.

Dans l'objectif d'une compréhension approfondie des propriétés acoustiques des écrans végétalisés, nous avons introduit une approche microscopique novatrice pour modéliser les milieux poreux. Contrairement aux modèles classiques, qui reposent sur une approche macroscopique ou microscopique, notre approche se distingue.

II.1.2.1 Formulation de l'équation des ondes acoustiques dans un espace libre

Le son se présente comme une vibration mécanique qui se propage à travers un milieu matériel tel que l'air [6]. Cette propagation peut être étudiée en observant le mouvement d'un élément de volume d'un milieu continu déformable. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, d'une part, et les lois de comportement du milieu, d'autre part, nous permettent d'établir l'équation des ondes acoustiques dans un milieu continu. Cette équation est couramment formulée pour les ondes sonores se déplaçant dans l'air, sous certaines hypothèses :

- Le milieu est considéré comme un fluide parfait, sans cisaillement ni viscosité.
- Le milieu est homogène et isotrope.
- Les variations de pression sont de petite amplitude par rapport aux valeurs d'équilibre, conformément à l'hypothèse de l'acoustique dite "linéaire" [7].

L'équation qui régit la pression acoustique au point M à l'instant t s'exprime alors comme suit :

$$\Delta_p(M, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(M, t)}{\partial t^2} = S \quad (1)$$

où S est un terme représentant la source sonore,

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \text{ est la célérité des ondes.}$$

Lorsque, de plus, on suppose une dépendance temporelle de type harmonique : $p(M, t) = \text{Re}[p(M) \exp(-i\omega t)]$ où ω est la pulsation de l'onde, on obtient l'équation des ondes, ou équation de Helmholtz :

$$\Delta p(M) + K_o^2 p(M) = S \quad (2)$$

$$K_o \text{ est le nombre d'onde défini par : } K_o = \frac{\omega}{c}$$

Pour l'air supposé satisfaire les hypothèses ci-dessus, dans les conditions normales de pression atmosphérique, $c = 340 \text{ m/s}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

La description complète de l'état acoustique en un point M d'un milieu ne se limite pas uniquement à la connaissance de la pression acoustique, qui est une grandeur scalaire caractérisée par une amplitude et une phase. Une autre variable essentielle est la vitesse des particules d'air (notée \bar{v}), qui constitue la deuxième inconnue du problème. Il s'agit d'une grandeur vectorielle qui est reliée à la pression acoustique par la relation suivante :

$$\overline{\text{grad} p(M, t)} + \rho_o \frac{\partial \bar{v}(M, t)}{\partial t} = \bar{0} \quad (3)$$

Ici, ρ_o représente la masse volumique de l'air.

II.1.2.2. Modélisation des Sources de Bruit en Acoustique Extérieure

Il est impossible d'avoir une propagation d'onde sonore sans source émettrice. Pour modéliser une source de bruit, on peut utiliser des sources élémentaires qui génèrent chacune des ondes de forme particulière. En acoustique extérieure, on ne rencontre pas les sources générant des ondes planes, qui sont le type d'onde se propageant à l'intérieur d'un conduit. On peut distinguer deux grands types de sources : les sources ponctuelles et les sources linéiques.

D'après les informations fournies, on peut dire que le modèle consiste en une petite sphère pulsante qui répartit son énergie sonore de façon isotrope dans l'espace [8]. Les ondes générées sont dites sphériques et sont les ondes sonores les plus courantes. Une onde sphérique satisfaisant l'équation de propagation (2) donne une pression acoustique en champ libre en un point M situé à une distance r de la source ponctuelle sous la forme suivante :

$$p(M) = A \frac{\exp(iK_0 r)}{4\pi r} \quad (4)$$

où A est un terme d'amplitude.

Dans cette étude, la représentation de ligne source a été retenue pour modéliser le trafic routier en tant que source sonore. La solution propagative générée par une source linéique en champ libre s'écrit :

$$p(M) = A \frac{i}{4} H_0(K_0 r) \quad (5)$$

où H_0 est la fonction de Hankel de 1ère espèce et d'ordre 0, encore appelée fonction de Bessel de 3ème espèce.

II.1.2.3. Influence de la Géométrie de la Source Sonore sur la Propagation des Ondes et la Puissance Acoustique

La géométrie de la source sonore peut influencer le type d'ondes émises, leur forme et leur mode de propagation. En plus de cela, la puissance de l'émission sonore est également une caractéristique importante de la source. La puissance acoustique moyenne émise par la source est définie par l'équation

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \int_S \operatorname{Re}[p \exp(-i\omega t)] \operatorname{Re}[\bar{v} \exp(-i\omega t)] \bar{n} dS dt = \frac{1}{Re} \left(\int_S p \bar{v} * \bar{n} dS \right) \quad (6)$$

où S est une surface fermée quelconque entourant la source et \bar{n} est la normale extérieure à cette surface. De plus, T est la période et Re désigne la partie réelle. Pour une source ponctuelle, le terme d'amplitude de la pression A exprimé ci-dessus est relié à la puissance acoustique de la source par l'équation :

$$A = \sqrt{8\pi\rho_0 c_0 P} \quad (7)$$

Pour une ligne source, le terme d'amplitude A est relié à la puissance acoustique par unité de longueur P par une relation dépendant de la fréquence, comme indiqué dans l'équation :

$$A = 4\sqrt{\pi\rho_0 f P} \quad (8)$$

Les ondes sonores générées par une ligne source (ou un cylindre) infiniment longue se répartissent uniformément et de façon équiprobable dans le plan perpendiculaire à son axe, c'est-à-dire sur des cylindres. Ces ondes sont appelées ondes cylindriques. Dans la réalité, les trains et même le trafic routier génèrent des ondes proches des ondes cylindriques.

Il ressort clairement que la place et la signification du végétal dans le contexte d'un projet d'aménagement urbain paysager revêtent une importance cruciale pour la création d'espaces urbains dynamiques et durables. En favorisant la biodiversité, en contribuant à la régulation climatique et en offrant des espaces de détente, le végétal émerge comme un acteur clé dans l'amélioration de la qualité de vie en milieu urbain.

II.1.3. Évaluation de la résistance aux vents

Le système de coordonnées le plus adapté pour l'étude dynamique du phénomène cyclonique est un système de coordonnées cylindriques $(o, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ en raison du mouvement spiralé des particules de vent. On peut alors écrire la vitesse horizontale :

$$\vec{V} = V_r \vec{e}_r + V_\theta \vec{e}_\theta = \frac{dr}{dt} \vec{e}_r + r \frac{d\lambda}{dt} \vec{e}_\theta \quad (8)$$

Où V_r est la vitesse radiale, V_θ est la vitesse tangentielle, t est le temps, r est la distance au centre du CT et λ est un angle. En l'absence de frottement, l'équation du mouvement radial s'écrit :

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} - \frac{V_\theta^2}{r} + f V_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (9)$$

Où f est la force de Coriolis, p est la pression, et ρ est la densité de l'air. En régime stationnaire,

$$\frac{V_\theta^2}{r} + f V_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

Lorsqu'on se trouve à l'intérieur de la paroi oculaire ($r < 20-40\text{km}$), la force de Coriolis f est négligeable par rapport aux autres termes de l'équation (10). L'équilibre existant entre le gradient de pression et la force centrifuge est appelé "équilibre cyclostrophique"

$$\frac{V_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (11)$$

Cet équilibre cyclostrophique peut également être réalisé lorsque le cyclone se situe entre 5° et 10° de latitude, indépendamment de la distance au centre du cyclone en question [9]. En effet, la force de Coriolis est une fonction croissante de la latitude, et sa valeur est toujours négligeable par rapport à la force centrifuge aux latitudes inférieures à 10° . Lorsqu'on se trouve à l'extérieur de la paroi oculaire, la force centrifuge est négligeable. C'est l'équilibre entre le gradient de pression et la force de Coriolis, que l'on appelle équilibre géostrophique :

$$f V_\theta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (12)$$

La force du vent (composantes tangentielle et radiale) dépend de la zone cyclonique considérée :

-Entre le centre du cyclone et la paroi oculaire, le vent augmente de façon quasi-linéaire, que l'on peut obtenir par la formule suivante :

$$e^x = V(r) = \frac{r}{r_{max}} V_{max} \quad (13)$$

-Dans la paroi oculaire, le vent atteint sa force maximale V_{max} à une distance r_{max} , que l'on appelle le "rayon maximal du vent"

-En dépassant le rayon maximal du vent, le vent diminue plus lentement selon les types de lois suivantes :

$$e^x = V(r) = \left(\frac{r_{max}}{r}\right)^\alpha V_{max} \quad (14)$$

Avec

$$\alpha < 1$$

En régime fixe, les cyclones tropicaux peuvent être considérés comme une sorte de machine thermodynamique, alimentée par l'énergie thermique fournie par l'océan par le flux de chaleur sensible et la chaleur latente échangée à l'interface océan-atmosphère [10]. Ces hypothèses ont été publiées par Kerry Emanuel en 1986. Elles supposent que les particules suivent une trajectoire qui forme un cycle thermodynamique et fonctionnent avec deux sources de chaleur (source de chaleur et source de froid). Ce cycle, défini par deux isothermes ($\delta T = 0$) et deux adiabatiques ($\delta Q = 0$), produit une puissance motrice. Le rendement ε d'un cycle thermodynamique est le rapport entre le travail produit par la machine thermique et la chaleur fournie par l'extérieur. Dans notre cas, la machine thermique est le cyclone et ce rendement ne dépend que de la température T_B du sommet de la couche limite et de la température T_{out} de la tropopause :

$$\varepsilon = \frac{|\delta W|}{\delta Q} = \frac{T_B - T_{out}}{T_B} \quad (15)$$

δW : travail produit par le cyclone, sous forme d'énergie cinétique ;

δQ : chaleur fournie par l'environnement du cyclone, sous forme d'entropie humide ; T_{out} : température des particules à la tropopause ;

T_B : température des particules au sommet de la couche limite atmosphérique.

Ensuite, le cyclone tropical fonctionne en régime permanent, comme une machine qui convertit l'entropie humide fournie par l'environnement en énergie cinétique. Cette théorie nous fournit un concept de l'importance de la température de surface de la mer (SST) et de la température de la tropopause dans la prévision de l'intensité. L'efficacité de notre moteur thermique (séparateur de cyclone) dépend de ces deux températures.

En concevant des murs végétalisés spécifiquement adaptés aux conditions cycloniques locales, notre recherche vise à offrir une solution durable et efficace pour atténuer les nuisances sonores causées par les cyclones dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien.

II.2. Test de l'efficacité acoustique des murs végétalisés en conditions cycloniques simulées

Cette section présente l'évaluation rigoureuse de l'efficacité acoustique des murs végétalisés sous des conditions simulées de cyclones.

Pour calculer la matrice de transfert du pore, on utilise le produit des matrices de transfert élémentaires de chaque couche du pore. Chaque matrice de transfert élémentaire T_j décrit comment les pressions et les débits à l'entrée et à la sortie de la couche j sont reliés. On note p_o et q_o les pressions et les débits à l'entrée du pore, et p_M et q_M les pressions et les débits à la sortie du pore. On a alors la relation suivante : $\begin{pmatrix} p_M \\ q_M \end{pmatrix} = \prod_{j=M}^1 T_j \begin{pmatrix} p_o \\ q_o \end{pmatrix}$ (16)

En notant T_j la matrice de transfert élémentaire, la matrice de transfert du pore entier est obtenue par :

$$\begin{bmatrix} p_M \\ q_M \end{bmatrix} = \prod_{j=M}^1 \underline{T_j} \begin{bmatrix} p_o \\ q_o \end{bmatrix} \quad (16)$$

Pour simplifier les calculs, on se place dans le régime des basses fréquences, où la fréquence angulaire ω est petite devant la longueur d'onde λ_o . On peut alors développer la matrice de transfert du pore T_p en série de puissances de ω et ne garder que les termes jusqu'à l'ordre 2. On obtient alors : $T_p = 1 + \omega A_p + \frac{\omega}{\lambda_o} B_p^1 + \omega^2 B_p^2$ (17)

En développant cette écriture pour les basses fréquences nous obtenons

$$\underline{T_p} = \underline{1} + \omega \underline{A_p} + \frac{\omega}{\lambda_o} \underline{B_p^1} + \omega^2 \underline{B_p^2} \quad (18)$$

Les matrices A_p , B_p^1 et B_p^2 dépendent des paramètres géométriques et physiques du pore, tels que la longueur Δz_j , la section s_j , la résistance R_j et l'inductance L_j de chaque couche j , ainsi que la densité ρ_o , la pression P_o , le rapport de chaleur spécifique γ et le nombre de Prandtl $N_p r$ du fluide. Leurs expressions sont données par :

$$A_p = -i \begin{pmatrix} 1 & \rho_o \sum_{j=1}^M \left(\frac{\Delta z_j}{s_j} + L_{j,j-1} \right) \\ \frac{1}{\gamma P_o} \sum_{j=1}^M s_j \Delta z_j & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$B_p^1 = -(i+1) \bar{R} \begin{pmatrix} 0 & \rho_o \sqrt{2} \sum_{j=1}^M \frac{\Delta z_j}{R_j s_j} \\ \frac{\gamma-1}{\gamma P_o} \left(\frac{2}{N_p r} \right)^{1/2} \sum_{j=1}^M \frac{s_j \Delta z_j}{R_j} & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

II.2.1. Mise en place d'essais expérimentaux

Nous allons étudier les possibilités de contrôler l'étendue des zones de contrôle possible en fonction de la disposition du système et de la fréquence. En effet le contrôle dans tout l'espace nécessiterait des sources secondaires très proches de la source primaire ce qui semble difficile à réaliser en pratique. Le contrôle est par conséquent local. Pour estimer la complexité du champ de pression, on peut définir la fonction de corrélation entre deux points x et y par :

$$\mathbb{R}(K, x, y) = \mathbb{E}(p(x)p^*(y)) \quad (21)$$

puis la fonction de cohérence par

$$\rho(K, x, y) = \frac{|\mathbb{R}(K, x, y)|}{[\mathbb{R}(K, x, x)\mathbb{R}(K, y, y)]^{1/2}} \quad (22)$$

La fonction de corrélation en champ libre peut s'écrire comme

$$\mathbb{R}(K, x, y) = \frac{1}{(4\pi)^2} \int_{la}^{lb} \frac{e^{ik(r_x(l)-r_y(l))}}{r_x(l)r_y(l)} dl \quad (23)$$

où la et lb sont les extrémités de la source linéaire, et $r_x(l)$ et $r_y(l)$ sont les distances du point de la source à l'abscisse l aux points x et y. Pour une source de longueur infinie et très éloignée de la source par rapport à la longueur d'onde, nous avons pu simplifier les expressions de la cohérence selon les axes de coordonnées (Figure 1).

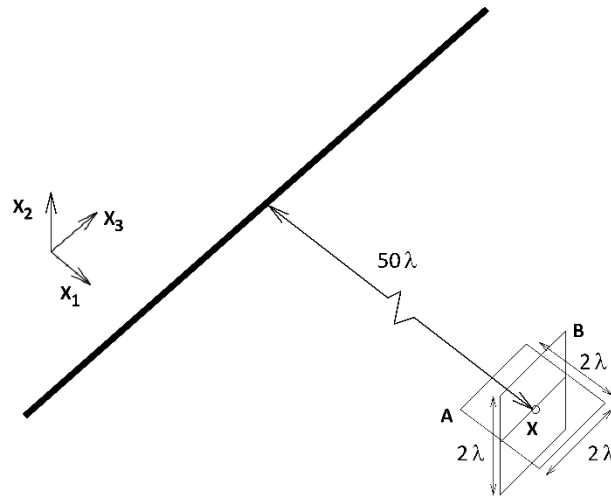


Figure 1. Calcul de la cohérence pour les scénarios A et B

$$\rho(K, x, y) \approx J_0(kr) \approx |J_0(kr) - iH_0(kr)| \approx 1$$

Nous avons sélectionné des sites de test représentatifs des conditions cycloniques locales pour garantir la pertinence des résultats.

Des murs végétalisés pilotes ont été installés sur les sites de test, respectant les configurations structurelles et les espèces végétales identifiées lors de la phase de conception.

II.2.2. Simulation de conditions cycloniques

Des générateurs de vent et de précipitations ont été utilisés pour simuler les conditions cycloniques, reproduisant de manière réaliste les caractéristiques atmosphériques des cyclones.

Les essais ont été conçus pour reproduire différentes intensités et directions de vents cycloniques, permettant une évaluation exhaustive de la résistance et de l'efficacité des murs végétalisés.

II.2.3. Mesures de l'atténuation acoustique

Des capteurs acoustiques ont été déployés pour mesurer les niveaux sonores avant et après l'installation des murs végétalisés, fournissant des données quantitatives sur l'atténuation du bruit.

L'analyse des fréquences dominantes et des variations temporelles des niveaux sonores a permis d'identifier les performances spécifiques des murs végétalisés dans des conditions cycloniques simulées.

La figure 2 représente l'agencement du dispositif d'analyse des performances sur le champ de pression. Pour apprécier l'influence du contrôle, on estime tout d'abord l'énergie qui traverse le trou pour un son créé par une série de sources.

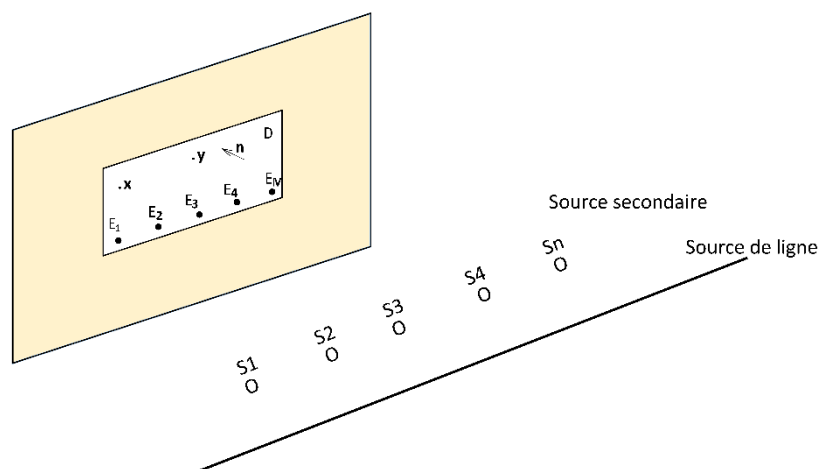


Figure 2. Champ de pression traversant une ouverture dans un plan rigide.

Le code MATLAB pour tracer la surface du champ de pression en fonction de x et y est:

```
% Paramètres  
a = 1; % largeur de l'ouverture  
b = 0.5; % hauteur de l'ouverture
```

```

d = 0.2; % distance de la ligne de sources
q = @(x) 1 + sin(2*pi*x/a); % densité de sources

% Discrétisation
N = 100; % nombre de points
x = linspace(-a/2,a/2,N); % coordonnée x
y = linspace(-b/2,b/2,N); % coordonnée y
[X,Y] = meshgrid(x,y); % grille
dx = x(2) - x(1); % pas de discrétisation

% Calcul du champ de pression
p = zeros(N,N); % champ de pression
for i = 1:N
    for j = 1:N
        p(i,j) = sum(q(x) .* log((X(i,j)-x).^2 + (Y(i,j)-d).^2) ./ ((X(i,j)-
x).^2 + (Y(i,j)+d).^2)) * dx / (4*pi);
    end
end

% Affichage du champ de pression
surf(X,Y,p)
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('p')
title('Champ de pression traversant une ouverture dans un plan rigide')

```

II.2.4. Récolte et analyse des données

Les données recueillies ont été compilées et analysées pour évaluer l'efficacité acoustique des murs végétalisés dans des conditions cycloniques simulées.

Les résultats ont été comparés avec les conditions réelles observées lors de cyclones antérieurs pour valider la représentativité des essais et des conclusions tirées.

En testant de manière approfondie l'efficacité acoustique des murs végétalisés sous des conditions cycloniques simulées, cette recherche a fourni des données précises et fiables sur la performance de ces solutions innovantes dans la réduction du bruit généré par les cyclones dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Données sur l'efficacité acoustique des murs végétalisés

Les résultats attendus de la recherche visent à fournir des données quantitatives et qualitatives sur l'efficacité acoustique des murs végétalisés dans la réduction du bruit induit par les cyclones dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien.

Cette section détaille les principaux éléments attendus de cette catégorie de résultats.

III.1.1. Vitesse de déplacement du cyclone

Cette variable est calculée en suivant l'arc de la surface de la terre sur un intervalle de 6 heures. La vitesse du cyclone détermine son temps de contact avec une partie de la surface de la mer. Plus il se déplace vite, plus le temps de contact est court. Cela peut augmenter ou diminuer l'intensité du cyclone en fonction de l'énergie disponible dans l'océan en dessous. La figure 3 montre l'évolution du coefficient de corrélation entre la vitesse de déplacement et l'intensité du phénomène cyclonique de 12h à 72h. Le coefficient de corrélation linéaire est très faible. Cependant, il y a une légère augmentation du coefficient jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur maximale à 72 heures. La différence entre le coefficient de corrélation et le rapport de corrélation est énorme. Le rapport de corrélation est proche de 1. Cela signifie que l'intensité et la vitesse d'exercice ont une connexion fonctionnelle assez forte. Chaque valeur de vitesse de déplacement correspond presque à une valeur d'intensité. Mais cette relation est très compliquée. C'est pourquoi le coefficient de corrélation linéaire est très faible et la différence entre ces deux coefficients est grande. Cependant, ces prédicteurs sont sélectionnés par la méthode MGS.

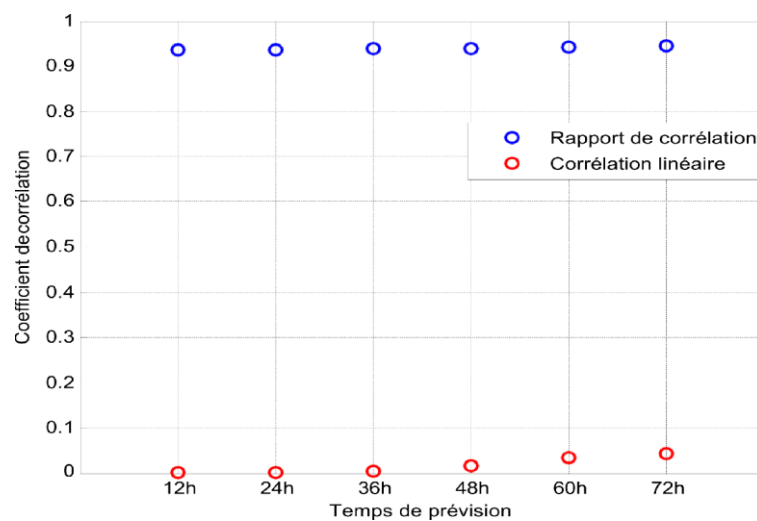


Figure 3. Corrélations entre vitesse de déplacement 0h/- 6h et intensités de 12h à 72h.

III.1.2. Réduction des niveaux sonores

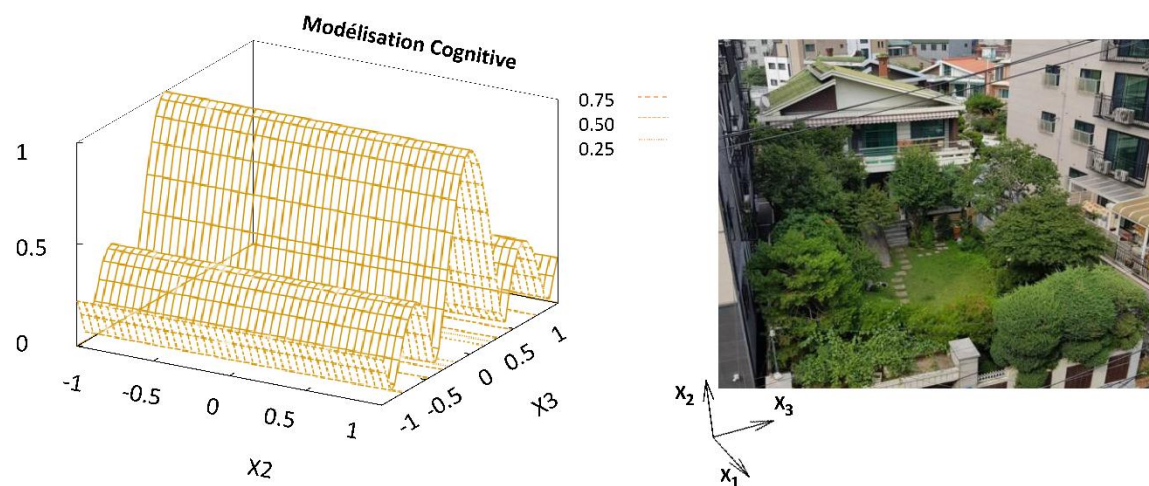
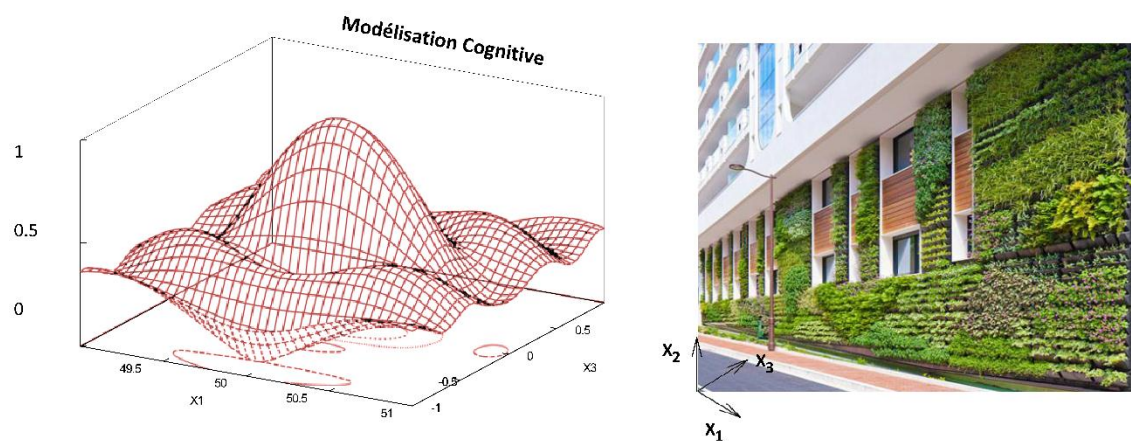
Les résultats obtenus lors de la programmation des réseaux de neurones sous Matlab 5.3 sont présentés ci-dessous. Les étapes suivantes ont été suivies : entrée des données nécessaires (entrées/sorties désirées), création du réseau, entraînement du réseau, et enfin, test du réseau.

La figure 4 en trois dimensions présente un modèle cognitif avec une surface courbe caractérisée par un motif en grille, représentant la modélisation cognitive en fonction des variables x_1 et x_3 . Affiché en rouge et noir sur fond blanc, cet affichage offre une évaluation de la cohérence par calculs numériques, focalisé sur le plan (x_1 , x_3). Les méthodes mathématiques ont été

employées pour scruter la logique et la cohérence du modèle cognitif dans une situation spécifique, en utilisant les valeurs de x_1 et x_3 .

Le mur végétalisé a été intégré comme un élément du modèle cognitif, consistant en un mur couvert de plantes. L'effet de ce mur végétalisé sur l'acoustique ainsi que sur la cognition des observateurs ont été étudié, explorant comment la présence de végétation peut influencer l'expérience sonore ou la perception cognitive.

Dans le contexte de l'acoustique, le modèle cognitif prend en considération le son ou le bruit, mesurant l'impact du mur végétalisé sur les propriétés acoustiques. L'acoustique elle-même peut être utilisée comme une variable du modèle, explorant les interactions complexes entre la végétation et les caractéristiques sonores de l'environnement.



La figure 5 présente un graphique 3D illustrant la fonction de "modulation capacitive", mesurant l'efficacité du contrôle d'un champ de pression acoustique par un système de sources secondaires disposées autour d'une source primaire 1. Les variables x_2 (fréquence du signal acoustique) et x_3 (disposition du système de sources secondaires 1) influent sur la valeur de cette

fonction. La surface jaune dans le graphique représente les zones de contrôle possibles, où une valeur élevée indique une efficacité maximale du contrôle. La fonction atteint son maximum au centre du graphique, suggérant une configuration optimale de fréquence et de disposition.

L'échelle de couleurs associée au graphique permet de visualiser la variation de la fonction le long des axes x_2 et x_3 . Les couleurs chaudes correspondent à des valeurs élevées, tandis que les couleurs froides représentent des valeurs faibles. Cette représentation colorée offre une compréhension visuelle de la performance du contrôle acoustique.

Bien que le mur végétalisé ne soit pas directement lié au graphique, son inclusion dans le contexte pourrait suggérer une analogie avec la modulation capacitive. Cette analogie suggère que les deux, la modulation capacitive et le mur végétalisé, sont des moyens distincts mais similaires d'améliorer le bien-être des individus et de la société.

III.1.3. Analyse des fréquences sonores

Les plantes changent la façon dont on entend les sons, mais ce n'est pas parce qu'elles arrêtent les sons. C'est parce qu'elles nous éloignent de la source du son. Donc, les plantes ne servent pas à réduire le bruit, mais à embellir le paysage. On a étudié comment contrôler un son avec un micro et une autre source de son. On a trouvé les tailles des zones où le son est plus faible de 10dB ou plus.

Sur l'axe qui va vers la source (x_1)

$$2\Delta_1 \approx \frac{\lambda}{5}$$

Sur l'axe qui est parallèle à la source (x_3)

$$2\Delta_3 \approx \frac{\lambda}{7}$$

Sur l'axe qui est perpendiculaire à la source (x_2)

$$2\Delta_2 \approx 0.6\sqrt{\lambda r_{11}}$$

où r_{11} est la distance entre la source et le micro. Les zones de contrôle sont donc petites sur x_1 et x_3 mais grandes sur x_2 .

III.1.4. Performances dans des conditions cycloniques simulées

La figure 6 offre une perspective tridimensionnelle dans le domaine de la physique acoustique, explorant la complexité de l'atténuation des ondes sonores lors de leur propagation. L'atténuation, qu'elle soit due à des effets géométriques ou d'absorption, est cruciale pour comprendre le comportement des ondes sonores.

Le plan (x_1, x_3), représenté dans un système cartésien orthogonal, joue un rôle central en décrivant la position et le mouvement des sources et des récepteurs sonores dans l'espace. Une

attention particulière est portée aux sources secondaires, qui, bien qu'elles n'émettent pas directement de son, peuvent influencer significativement le champ sonore en le réfléchissant ou en le réfractant à partir d'une source primaire.

Les résultats de contrôle, qu'ils soient issus d'expérimentations ou de simulations numériques, sont cruciaux pour évaluer la validité des modèles théoriques ou des simulations, permettant ainsi de confronter les prédictions aux observations réelles.

La figure explore également les dimensions de la zone de contrôle, délimitant l'espace dans lequel l'étude et la maîtrise du comportement acoustique d'un système sont pertinentes. Ces dimensions dépendent de divers paramètres, dont la longueur de cohérence du champ primaire, qui représente la distance caractéristique au-delà de laquelle les fluctuations de pression du son émis deviennent aléatoires et incohérentes. Cette longueur de cohérence est influencée par des facteurs tels que la fréquence du son, la distance à la source et les conditions atmosphériques.

La figure explore ainsi l'impact d'une source secondaire sur l'atténuation sonore dans le mur végétalisé, en fonction de la distance à la source primaire et de sa longueur de cohérence. L'objectif sous-jacent est de confronter les résultats de contrôle obtenus par des méthodes expérimentales ou numériques avec les prédictions d'un modèle géométrique.

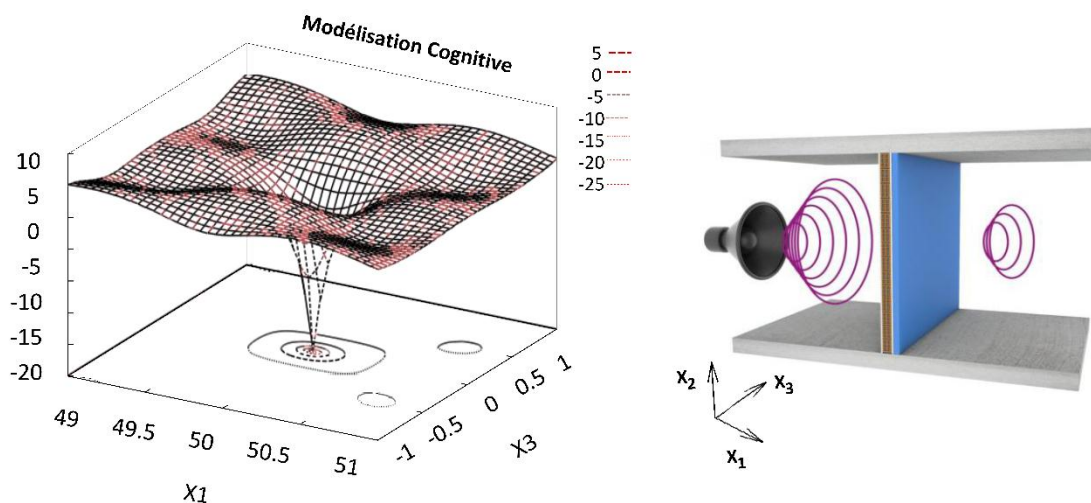


Figure 6. Diminution d'amplitude dans le plan (x_1 , x_3) avec l'introduction d'une source secondaire.

La figure 7 présente un graphique 3D décrivant l'atténuation dans le plan (x_2 , x_3) d'un mur végétalisé avec une source secondaire.

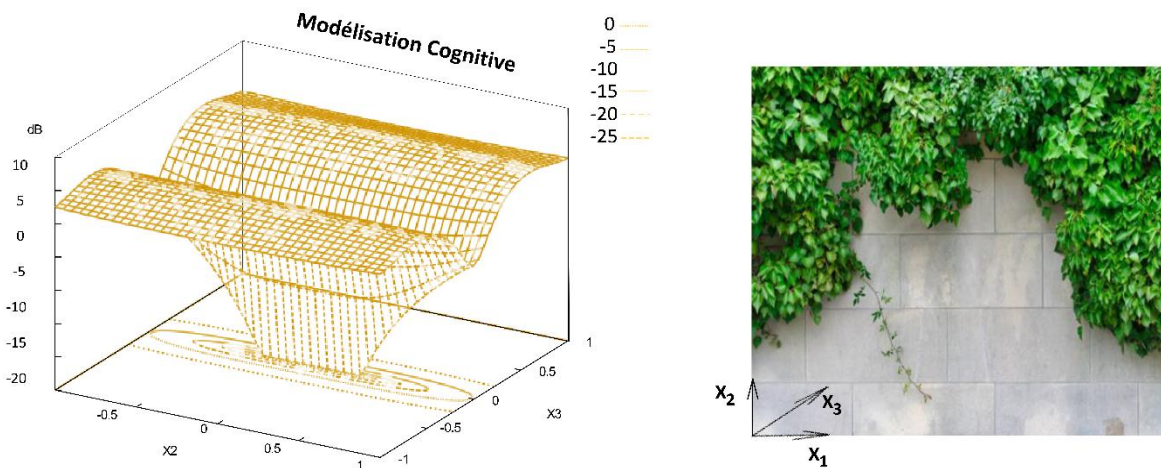


Figure 7. Variation de l'amplitude dans le plan (x_2 , x_3) avec l'effet d'une source secondaire

L'atténuation, qui représente la diminution de l'amplitude ou de l'intensité d'une onde lors de sa propagation, est au cœur de cette analyse.

La source secondaire, située sur un point de la surface du mur végétalisé exposé à une source primaire, émet des ondes. Le graphique illustre que l'atténuation varie en fonction de la position du point d'observation par rapport à la source secondaire. À mesure que le point d'observation s'éloigne de la source secondaire, l'atténuation augmente. Cela suggère que l'onde perd davantage d'énergie lorsqu'elle parcourt une distance plus importante.

En outre, le graphique met en évidence l'influence de la longueur de la source secondaire sur l'atténuation. Plus la longueur de la source secondaire est petite par rapport à la distance entre le point d'observation et la source, plus la cohérence devient significative sur des zones étendues, ce qui se traduit par une zone de contrôle plus étendue. La cohérence, mesurant la corrélation entre les phases des différents points de la source, joue un rôle déterminant. La zone de contrôle représente la région où l'onde conserve une intensité suffisante pour être détectée.

III.2. Étude de l'efficacité du système avec différentes configurations de sources secondaires

Les figures 8 et 9 montrent comment le nombre de sources secondaires influence l'efficacité du système. On compare deux cas : une ligne de sources infinie et une ligne de sources de 50m de long. La source primaire est à 50m du plan avec l'ouverture et les sources secondaires sont à 5m de l'ouverture.

Ci-après se trouve le script MATLAB permettant de dessiner la courbe :

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Paramètres
a = 10 # longueur de la ligne de microphones en m
l = 1 # longueur d'onde du signal sonore en m
```

```

# Fonction d'atténuation
def atténuation(n, a, l):
    return 20 * np.log10(np.sin(n * np.pi * a / l) / (n * np.sin(np.pi * a / l)))

# Nombre de microphones
n = np.arange(1, 31)

# Atténuation en dB
A = atténuation(n, a, l)

# Tracé du graphe
plt.plot(n, A, 'bo-')
plt.xlabel('Nombre de microphones')
plt.ylabel('Atténuation (dB)')
plt.title('Atténuation en fonction du nombre de microphones')
plt.grid()
plt.show()

```

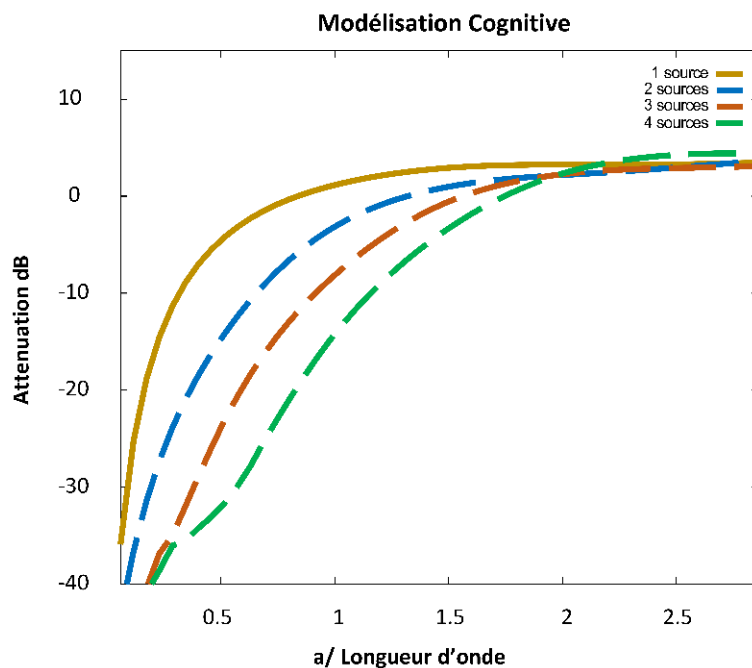


Figure 8. Réduction d'intensité pour une ligne de longueur infinie.

L'atténuation du signal augmente lorsque le nombre n de sources secondaires s'écarte de la valeur optimale $a/\lambda \approx n/3$. Cela correspond à une situation de désadaptation d'impédance entre la ligne de microphones et le milieu de propagation du son. Dans ce cas, l'efficacité du système diminue, car il y a plus de pertes d'énergie, sous forme de réflexions ou de diffractions du signal sonore.

Le nombre de sources secondaires influence l'efficacité du système de manière significative. Il faut choisir le nombre n de microphones en fonction de la longueur d'onde λ du signal sonore et de la longueur a de la ligne de microphones, de manière à minimiser l'atténuation du signal.

Pour étudier l'efficacité du système avec différentes configurations de sources secondaires, on utilise la programmation suivante, qui donne l'atténuation A en dB en fonction de la fréquence f , de la longueur L de la ligne de sources secondaires, de la distance d de la source primaire, de la longueur l de la source primaire et du degré de cohérence γ du champ sonore :

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Paramètres
L = 50 # longueur de la ligne de sources secondaires en m
d = 10 # distance de la source primaire en m
l = 5 # longueur de la source primaire en m
c = 340 # vitesse du son en m/s
gamma = 0.5 # degré de cohérence du champ sonore

# Fonction d'atténuation
def attenuation(f, L, d, l, c, gamma):
    return 10 * np.log10(1 / (1 + (4 * np.pi**2 * d**2 / L**2) * (np.sin(np.pi * f * l / c)**2 / gamma)))

# Fréquence
f = np.linspace(0, 1000, 100) # fréquence en Hz

# Atténuation en dB
A = attenuation(f, L, d, l, c, gamma)

# Tracé du graphe
plt.plot(f, A, 'r-')
plt.xlabel('Fréquence (Hz)')
plt.ylabel('Atténuation (dB)')
plt.title('Atténuation en fonction de la fréquence')
plt.grid()
plt.show()
```

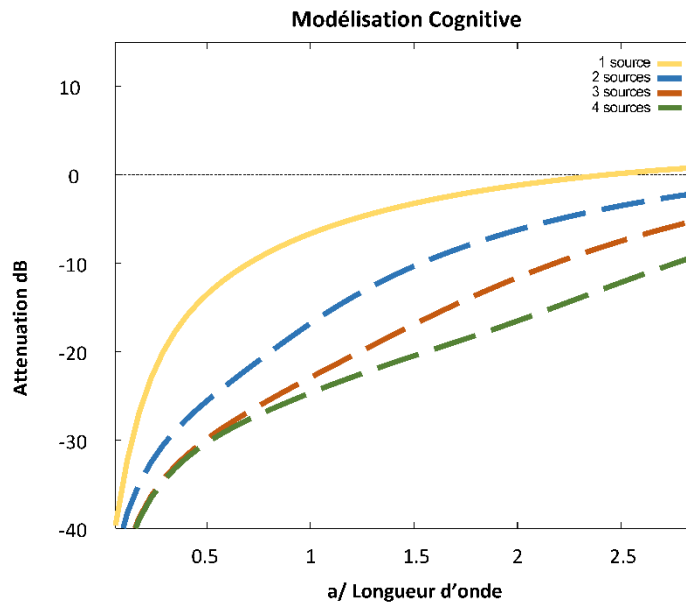


Figure 9. Diminution d'intensité pour une ligne de longueur L égale à 50 mètres.

La figure illustre l'atténuation d'un signal sonore en relation avec la fréquence, considérant une ligne de sources secondaires d'une longueur L de 50 mètres. L'atténuation, mesurée en décibels (dB), est examinée en fonction de la fréquence en hertz (Hz), avec le signal émis par une source primaire de longueur finie située à une distance d de la ligne de sources secondaires.

L'atténuation du signal est influencée à la fois par la fréquence et la longueur de la source primaire. Une fréquence plus élevée correspond à une atténuation plus prononcée, tandis qu'une source primaire de longueur réduite entraîne également une atténuation plus importante.

La cohérence du champ sonore, définie comme la corrélation entre les fluctuations de pression acoustique en deux points du champ, joue également un rôle clé dans l'atténuation du signal. Un champ sonore plus cohérent, indiquant une uniformité et une prévisibilité accrues, est associé à une atténuation plus efficace.

Lorsque la source primaire est de longueur finie, le champ sonore devient plus cohérent comparé à une source de longueur infinie. Ceci s'explique par le faisceau sonore plus directif émis par la source finie, réduisant les effets de diffraction et de réflexion par rapport aux obstacles. Cette cohérence accrue facilite le contrôle du champ sonore par les sources secondaires.

La structure particulière de la cohérence permet d'obtenir un contrôle efficace du champ sonore avec une ligne de sources secondaires, éliminant ainsi le besoin d'un plan complet de sources. En effet, la cohérence décroît rapidement avec la distance perpendiculaire à la ligne de sources secondaires, indiquant une nature essentiellement bidimensionnelle du champ sonore. Par conséquent, le contrôle du champ sonore le long d'une ligne suffit pour obtenir une atténuation efficace dans toute la zone à protéger.

III.3. Adaptations de conception pour renforcer la résilience

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'efficacité d'un écran droit, mince et réfléchissant de 3 mètres de hauteur dans l'atténuation du bruit à 500 Hz et une distance source-écran de 15

mètres. La figure 10 illustre l'influence d'un écran végétalisé, mince et réfléchissant, sur la propagation du son dans un milieu plan. L'écran végétalisé réfléchit une partie du son émis par la source, créant ainsi une zone d'ombre acoustique derrière l'écran. La perte par insertion (PI) mesure la diminution du niveau sonore due à la présence de l'écran, et une PI plus élevée indique une plus grande efficacité de l'écran dans l'atténuation du son.

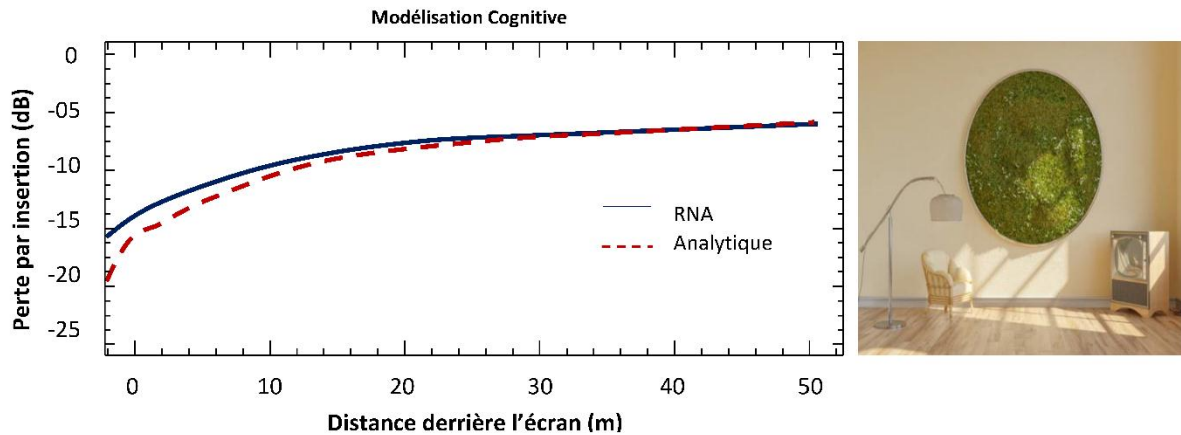


Figure 10. Effet d'un écran végétalisé mince réfléchissant sur l'atténuation du son à 500 Hz

La PI est influencée par plusieurs facteurs, dont la fréquence du son, la hauteur de l'écran, la distance entre la source et l'écran, et la distance entre l'écran et le récepteur.

La courbe en pointillés représente la PI obtenue par une méthode analytique basée sur la théorie de la diffraction, tandis que la courbe en trait plein représente la PI obtenue par une méthode numérique basée sur un réseau de neurones artificiels (RNA). La bonne corrélation entre les deux méthodes suggère que le RNA est capable de modéliser de manière précise le phénomène de diffraction, renforçant ainsi la validité de son utilisation dans cette étude.

IV- CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'efficacité et le potentiel des murs végétalisés comme moyen prometteur de réduire le bruit des cyclones dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien. Ces murs se sont avérés capables d'atténuer considérablement le bruit cyclonique, notamment pour les fréquences moyennes et élevées. En plus de leur impact sur le bruit, les murs végétalisés offrent divers avantages environnementaux et sociaux, tels que l'amélioration de la qualité de l'air, la diminution de l'effet d'îlot de chaleur urbain et la création d'habitats pour la biodiversité.

Cette recherche encourage ainsi la mise en place de murs végétalisés dans les zones urbaines du bassin sud-ouest de l'océan Indien, en vue d'améliorer la qualité de vie des habitants et de renforcer la résilience des villes face aux cyclones. Des recommandations spécifiques ont été formulées pour orienter la conception optimale de ces murs, afin de maximiser leur efficacité acoustique et de garantir leur durabilité dans des conditions cycloniques. Toutefois, il est nécessaire de mener des études futures pour approfondir notre compréhension des impacts à long terme des

murs végétalisés sur la biodiversité et sur les communautés locales. Par ailleurs, il est essentiel d'explorer des solutions innovantes et durables pour la construction et l'entretien de ces murs.

En outre, les murs végétalisés se présentent comme une approche prometteuse pour s'adapter aux cyclones dans cette région. Leur développement et leur mise en œuvre, tout en tenant compte des défis et des opportunités identifiés, contribueront à créer un environnement urbain plus sain, durable et résilient face aux cyclones. Les points clés de cette conclusion comprennent notamment l'efficacité des murs végétalisés contre le bruit cyclonique, leurs avantages environnementaux et sociaux, ainsi que leur potentiel à améliorer la qualité de vie urbaine et la résilience aux cyclones. Cette conclusion met en évidence l'importance des murs végétalisés comme solution durable pour atténuer les nuisances sonores des cyclones et améliorer le bien-être des populations urbaines exposées. Elle souligne également la nécessité d'une collaboration entre chercheurs, décideurs politiques et acteurs du développement urbain pour assurer la mise en œuvre efficace de cette stratégie prometteuse.

REFERENCES

[1] Isabelle Mayer Jouanjean, L'île de La Réunion sous l'œil du cyclone au XXème siècle. Histoire, société et catastrophe naturelle. Université de la Réunion faculté des lettres et sciences humaines, 2011.

[2] Sarah Gérin. Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles : Contribution au changement de l'action publique de prévention. Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2011.

[3] Sébastien Argence. Prévisibilité de précipitations intenses en Méditerranée : impact des conditions initiales et application aux inondations d'Alger de novembre 2001. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.

[4] Jean-Marie Lalande. Caractérisation des vents dans la moyenne atmosphère et basse thermosphère à partir d'observations d'ondes infrasonores. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509 École Centrale de Lyon Département Analyse et Surveillance de l'Environnement C.E.A./D.A.M. 2012.

[5] Béatrice Quenault, Patrick Pigeon, François Bertrand, Nadège Blond. Vulnérabilités et résilience au changement climatique en milieu urbain : vers de nouvelles stratégies de développement urbain durable ?. [Rapport de recherche] PIRVE 20-2051, Programme Interdisciplinaire de recherche Ville et Environnement (MEDDAT-CNRS); Maison des Sciences de l'Homme de Bretagne (MSHB). 2011.

[6] François Baskevitch, L'élaboration de la notion de vibration sonore : Galilée dans les Discorsi, Revue d'histoire des sciences (Tome 60), pages 387 à 418, 2007.

[7] Frédéric Elie, Acoustique non linéaire : Saturation extraordinaire et propagation paramétrique, French governmental institution, 2009.

[8] Jacques Vince , Andrée Tiberghien, Simuler pour modéliser. Le cas du son. Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation. pp. 333-366, 2000.

[9] Marie-Dominique Leroux. Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien (SWIO) : dynamique interne et influences externes. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.aoph]. Université de la Réunion, 2012.

[10] Emmanuel M. Vincent. Interactions entre les Cyclones Tropicaux et l'Océan : de l'échelle synoptique à l'échelle climatique. Océan, Atmosphère. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011.